

## 電力市場と容量市場における価格の曖昧性を考慮した 火力発電容量の投資価値評価

辻 村 元 男

エネルギー政策の基本方針の1つであるエネルギーの安定供給について懸念がもたれている。本研究は電力の安定供給のために、出力変更が容易な火力発電容量への投資について考察する。発電容量の1部は容量市場で売却され、残りの容量で発電された電力は電力市場で売却されるとする。したがって、発電容量への投資については、電力市場と容量市場を考慮した投資判断が必要となる。両市場の価格については曖昧性が存在し、発電容量の投資回収の予見性が低下している場合を考察する。そこで、本研究は、火力発電容量への投資について、リアルオプション・アプローチを用いて、基本的な投資評価モデルを構築する。発電事業者の問題は、価格に対する曖昧性が存在する下で、発電容量への最適な投資タイミングを求める問題として定式化される。定式化された問題は、変分不等式を用いて解き、最適な投資タイミングを導出する。さらに、いくつかのパラメータについて感度分析を行い、発電容量投資への示唆を与える。

### 1 はじめに

SDGs 目標7「すべての人々の、安価かつ信頼できる持続可能な近代的エネルギーへのアクセスを確保する」(国際連合広報センター, 2019)にもあるように、エネルギー政策の基本方針は、安全性を大前提とし、エネルギーの安定供給、経済効率性、環境への適合(S+3E)を同時に達成することにある(資源エネルギー庁, 2021)。取り分け、3Eの中でもエネルギーの安定供給は社会の基盤となっている。

電力の安定供給に関して、電力の小売り自由化以降は、発電容量への投資は電力市場で回収することになり、発電容量の投資回収の予見性が低下することや、再生可能エネルギーの導入拡大による電力市場価格の低下などによって、発電容量への投資が停滞することが懸念されていた(資源エネルギー庁, 2016)。気候変動への対策も加わり、火力発電の廃止が進み、資源エネルギー庁(2021)によると、2016-2020年度実績で火力発電の設備容量が約102万kW減少した。さらに、2021-2025年度は約441万kW、2026-2030年度は約1236万kW減少する見通しである。このため、現下の日本では、

電力の安定供給に懸念が高まっている。

自然条件に発電量が大きく左右される太陽光などの再生可能エネルギーが導入されるに従い、電力需給のバランスを調整するためには、バックアップ電源として、出力変更が容易な火力発電が必要である（資源エネルギー庁、2021）。中長期的に必要な電力の供給力を確保し、気候変動への対策とエネルギーの安定供給を両立させるためには、2000年代からヨーロッパや米国で導入されてきた容量メカニズムが有効な手段とされている（IEA, 2016；資源エネルギー庁、2016）。

容量メカニズムは、発電容量に対する経済的価値を容量価格（kW 価格）として支払うメカニズムである。容量メカニズムとしては、ドイツや北欧などで実施されている戦略的予備力、スペインなどで実施されている容量支払いや、米国、英国で導入された容量市場などがある。日本でも容量市場が創設され、2020年に第1回オークション、2021年には第2回オークションが開催された。容量メカニズムについては服部（2015）などを参照されたい。2回オークションが実施されたが、中長期的な電力の安定的な供給を確保するには至っておらず、容量市場の制度について見直しが進められている<sup>1)</sup>。

以上の社会背景に基づき、本研究は電力市場と容量市場を考慮した発電容量への投資についての理解を深めることを目的に、リアルオプション・アプローチを用いて、基本的な投資評価モデルを構築する。発電事業者は、火力発電容量への投資について検討している。投資後の発電容量の一部は容量市場で売却され、それ以外については、発電された電力は電力市場で売却されるとする。ここで、発電容量の投資回収の予見性の低下の要因の一つとして、両市場の価格について曖昧性が存在すると仮定する。

本研究では、Chen and Epstein（2002）による  $\kappa$ -ignorance の概念を用いて、曖昧性を表現する。発電事業者は、電力価格と容量価格の振る舞いについて確信が持てず、参照となる確率測度に対する信念を一定の範囲で拡大することで、両価格に対する曖昧性を表現する。本研究と同様に、曖昧性を  $\kappa$ -ignorance の概念で表現し、リアルオプション・アプローチを用いた資本投資の研究として、Nishimura and Ozaki（2007）；Trojanowska and Kort（2010）、Wang（2010）、Thijssen（2011）、Viviani et al.（2018）、De-laney（2022）などがある。

発電容量へのリアルオプション・アプローチを用いた研究としては、高野・高嶋（2015）や Brøndbo et al.（2020）などがある。本研究は高野・高嶋（2015）を参考に、電力市場と容量市場の価格について曖昧性を考慮した発電容量への投資問題を考察する。発電事業者の問題は、最適停止問題として定式化され、変分不等式を用いて解き、

発電容量に投資する最適なタイミングを導出する。さらには、感度分析をすることで、投資の予見性の低下が与える影響を明らかにする。

本稿の構成は以下である。第2節では、発電事業者の発電容量への投資問題を定式化する。次に、第3節では、定式化された発電事業者の問題を変分不等式を用いて解く。次いで、第4節では、数値例を用いていくつかのパラメータについて感度分析をする。最後に、第5節で、本稿をまとめる。

## 2 発電事業者の問題

発電事業者は、発電容量  $Q$  [kW] への投資を検討している。投資された容量の一定割合  $\alpha \in (0, 1)$  は、容量市場に売却され、残りの容量で発電された電力は電力市場で売却されるとする<sup>2)</sup>。容量1単位当たりの価格を  $X_t$  [円/kW] とすると、 $X_t \alpha Q$  の売却収入が発生する。ここで、 $X_t$  は次の幾何ブラウン運動に従っているとするとする。

$$dX_t = \mu_X X_t dt + \sigma_X X_t dW_t, \quad X_{0^-} = x > 0 \quad (1)$$

ただし、 $\mu_X > 0$ 、 $\sigma_X > 0$  は定数とする。 $W_t$  はフィルター付き確率空間  $(\Omega, \mathcal{F}^W, \mathbb{P}, \{\mathcal{F}_t^W\}_{t \geq 0})$  上の標準ブラウン運動である。時刻  $t$  における電力価格  $P_t$  は、次の幾何ブラウン運動に従っているとするとする。

$$dP_t = \mu_P P_t dt + \sigma_P P_t dZ_t, \quad P_{0^-} = p > 0 \quad (2)$$

ただし、 $\mu_P > 0$ 、 $\sigma_P > 0$  は定数とする。 $Z_t$  はフィルター付き確率空間  $(\Omega, \mathcal{F}^Z, \mathbb{P}, \{\mathcal{F}_t^Z\}_{t \geq 0})$  上における、標準ブラウン運動である。ここで、 $\mathbb{E}_{\mathbb{P}}[dZ dW] = \rho dt$  とする。

発電に掛かる操業費用を、単純化のため定額  $c$  [円/kWh] とすると、容量への投資以降の発電事業者の操業利益  $\pi$  は、

$$\pi(P_t) = [(1 - \alpha)P_t - c]Q, \quad t \geq \tau \quad (3)$$

となる。発電容量に対する投資費用  $I$  [円] は、次で与えられるとする。

$$I = bQ \quad (4)$$

ただし、 $b$  [円/kW] は投資1単位当たりの費用である。投資費用は全額埋没費用となり、不可逆な資本への投資問題となる。したがって、発電事業者の問題は、容量を拡張する最適なタイミング  $\tau \geq 0$  を決める問題となる。

本研究では、発電容量に対する投資回収の予見性の低下の要因の一つとして、発電事業者が、電力価格  $P_t$  と容量価格  $X_t$  の振る舞いについて確信が持てない場合を考察する。すなわち、両価格について曖昧性が存在する場合を考察する。参照となる確率測度  $\mathbb{P}$  に対する信念の範囲を  $[-\kappa, \kappa] := \{-\kappa_P, \kappa_P\}, \{-\kappa_X, \kappa_X\}$  とし、両価格に対する曖昧性を表現する。こうした信念の取り扱いは  $\kappa$ -ignorance と呼ばれる (Chen and Epstein, 2002)。密度生成作用素  $\theta_t := (\theta_t^P, \theta_t^X)$  とその集合  $\Theta$  を用いて、確率測度の集合  $\mathcal{P}^\theta$  を

$$\mathcal{P}^\theta := \{\mathbb{P}^\theta; \theta \in \Theta\} \quad (5)$$

とする。ただし、 $\Theta \in [-\kappa, \kappa]$  である。Girsanov の定理によって、

$$dZ_t^\theta = dZ_t + \theta_t^P dt, \quad dW_t^\theta = dW_t + \theta_t^X dt \quad (6)$$

は、確率測度  $\mathbb{P}^\theta$  の下で標準ブラウン運動である。(6) より、確率測度  $\mathbb{P}^\theta$  の下で、電力価格  $P_t$  と容量価格  $X_t$  は、それぞれ次のようになる。

$$dP_t = (\mu_P - \sigma_P \theta_t^P) P_t dt + \sigma_P P_t dZ_t^\theta, \quad P_0 = p > 0 \quad (7)$$

$$dX_t = (\mu_X - \sigma_X \theta_t^X) X_t dt + \sigma_X X_t dW_t^\theta, \quad X_0 = x > 0 \quad (8)$$

以上から、電力価格と容量価格に対する曖昧性を考慮する発電事業者の問題は、電力売却と容量売却から得られる収益が最も悪い場合を考え、容量投資プロジェクトの価値を最大とする最適な投資タイミングを求める問題となる。

$$V(p, x) = \sup_{\tau \in \mathcal{T}} \min_{\mathbb{P}^\theta \in \mathcal{P}^\theta} \mathbb{E}_{\mathbb{P}^\theta} \left[ e^{-r\tau} \left( \int_{\tau}^{\infty} e^{-r(t-\tau)} [(1-\alpha)P_t - c] Q dt + X_\tau \alpha Q - I \right) \right] \quad (9)$$

ただし、 $V$  は価値関数を表す。

### 3 変分不等式

発電事業者の問題 (9) は最適停止問題として定式化されており、変分不等式を用いて解く。まず、辻村 (2017) を参考に、変分不等式を導出する。発電事業者の問題 (9) の HJB 方程式は、次である。

$$\begin{aligned} V(p, x) &= \max \{ H(p, x) - I, e^{-r dt} \min_{\mathbb{P}^\theta \in \mathcal{P}^\theta} \mathbb{E}_{\mathbb{P}^\theta} [V(P_{dt}, X_{dt})] \} \\ &= \max \left\{ H(p, x) - I, e^{-r dt} \min_{\theta \in [-\kappa, \kappa]} \mathbb{E}_{\mathbb{P}^\theta} [V(P_{dt}, X_{dt})] \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

ただし、 $H$  は収益が最も悪い場合を考えた投資プロジェクトの現在価値であり、次のように求まる。

$$\begin{aligned} H(P_t, X_t) &= \min_{\mathbb{P}^\theta \in \mathcal{P}^\theta} \mathbb{E}_{\mathbb{P}^\theta} \left[ \int_t^\infty e^{-rs} [(1-\alpha)P_s - c] Q ds + X_t \alpha Q \right] \\ &= \min_{\theta \in [-\kappa, \kappa]} \mathbb{E}_{\mathbb{P}^\theta} \left[ \int_t^\infty e^{-rs} [(1-\alpha)P_s - c] Q ds + X_t \alpha Q \right] \\ &= \frac{(1-\alpha)P_t Q}{r - (\mu_P - \sigma_P \kappa_P)} - \frac{cQ}{r} + \alpha X_t Q \end{aligned} \quad (11)$$

$H(p, x) - I \geq e^{-r dt} \min_{\theta \in [-\kappa, \kappa]} \mathbb{E}_{\mathbb{P}^\theta} [V(P_{dt}, X_{dt})]$  なら、直ちに容量へ投資することが選ばれる。したがって、(10) は次となる。

$$V(p, x) = H(p, x) - I \quad (12)$$

一方、 $H(p, x) - I < e^{-r dt} \min_{\theta \in [-\kappa, \kappa]} \mathbb{E}_{\mathbb{P}^\theta} [V(P_{dt}, X_{dt})]$  なら、次の時刻まで投資の判断を延期することとなる。したがって、(10) は次となる。

$$V(p, x) = e^{-r dt} \min_{\theta \in [-\kappa, \kappa]} \mathbb{E}_{\mathbb{P}^\theta} [V(P_{dt}, X_{dt})] \quad (13)$$

伊藤の公式を適用すると、(13)式は次のように書き直せる。

$$\begin{aligned}
 V(p, x) &= e^{-rdt} \min_{\theta \in [-\kappa, \kappa]} \mathbb{E}^{\mathbb{P}^\theta} [V(P_{dt}, X_{dt})] \\
 &= (1 - rdt) \min_{\theta \in [-\kappa, \kappa]} \mathbb{E}^{\mathbb{P}^\theta} [V(p, x) + dV(p, x)] \\
 &= (1 - rdt) \min_{\theta \in [-\kappa, \kappa]} \mathbb{E}^{\mathbb{P}^\theta} [V(p, x) + V_P(p, x)dP_t + V_X(p, x)dX_t \\
 &\quad + \frac{1}{2}V_{PP}(p, x)dP_t^2 + \frac{1}{2}V_{XX}(p, x)dX_t^2 + V_{PX}(p, x)dP_t dX_t] \\
 &= (1 - rdt) \min_{\theta \in [-\kappa, \kappa]} [V(p, x) + [(\mu_P - \sigma_P \theta^P)pV_P(p, x) + (\mu_X - \sigma_X \theta^X)xV_X(p, x) \\
 &\quad + \frac{1}{2}\sigma_P^2 p^2 V_{PP}(p, x) + \frac{1}{2}\sigma_X^2 x^2 V_{XX}(p, x) + \sigma_P \sigma_X \rho p x V_{PX}(p, x)]dt] \\
 &= (1 - rdt)[V(p, x) + [(\mu_P - \sigma_P \kappa_P)pV_P(p, x) + (\mu_X - \sigma_X \kappa_X)xV_X(p, x) \\
 &\quad + \frac{1}{2}\sigma_P^2 p^2 V_{PP}(p, x) + \frac{1}{2}\sigma_X^2 x^2 V_{XX}(p, x) + \sigma_P \sigma_X \rho p x V_{PX}(p, x)]dt]. \tag{14}
 \end{aligned}$$

ただし、 $V_P(p, x) = \frac{\partial V(p, x)}{\partial P}$ ,  $V_X(p, x) = \frac{\partial V(p, x)}{\partial P}$ ,  $V_{PP}(p, x) = \frac{\partial^2 V(p, x)}{\partial P^2}$ ,  
 $V_{XX}(p, x) = \frac{\partial V(p, x)}{\partial^2 P}$ ,  $V_{PX}(p, x) = \frac{\partial^2 V(p, x)}{\partial P}$  である。さらに、 $dt$  の 0 への極限を取ると  
 $(\lim_{dt \rightarrow 0})$ , (13)式は、

$$\begin{aligned}
 0 &= -rV(p, x) + (\mu_P - \sigma_P \kappa_P)pV_P(p, x) + (\mu_X - \sigma_X \kappa_X)xV_X(p, x) \\
 &\quad + \frac{1}{2}\sigma_P^2 p^2 V_{PP}(p, x) + \frac{1}{2}\sigma_X^2 x^2 V_{XX}(p, x) + \sigma_P \sigma_X \rho p x V_{PX}(p, x) \\
 &=: \mathcal{L}V(p, x) \tag{15}
 \end{aligned}$$

となる。ただし、 $\mathcal{L}$ は無限小作用素である。以上より、HJB方程式は、次のように書き直され、発電事業者の問題(9)に対する変分不等式と呼ばれる。

$$\max\{H(p, x) - I - V(p, x), \mathcal{L}V(p, x)\} = 0 \tag{16}$$

発電容量に投資しない領域(続行領域) $\mathcal{C}$ は、次で与えられる。

$$\mathcal{C} := \{(p, x); V(p, x) > H(p, x) - I\} \tag{17}$$

発電容量に投資する時刻  $\tau$  は、状態変数の組  $(p, x)$  が続行領域から外れる時であり、

$$\tau := \{t \geq 0; (p, x) \notin C\} \tag{18}$$

と与えられる。

$(p, x) \in C$  では、変分不等式 (16) から、偏微分方程式 (15) が成り立つ。  
 $\phi(p, x) = Ap^\beta x^\gamma$  を解の候補関数とすると、(15) の一般解は、

$$\phi(p, x) = A_1 p^{\beta_1} x^{\gamma_1} + A_2 p^{\beta_2} x^{\gamma_2} + A_3 p^{\beta_3} x^{\gamma_3} + A_4 p^{\beta_4} x^{\gamma_4} \tag{19}$$

となる。 $A_1 - A_4$  は決定すべき定数で、 $\beta_1 - \beta_4, \gamma_1 - \gamma_4$  は、次の特性方程式の解である。

$$\frac{1}{2} \sigma_p^2 \beta(\beta - 1) + \frac{1}{2} \sigma_x^2 \gamma(\gamma - 1) + \rho \sigma_p \sigma_x \beta \gamma + (\mu_p - \sigma_p \kappa_p) \beta + (\mu_x - \sigma_x \kappa_x) \gamma - r = 0 \tag{20}$$

(20) は楕円型方程式であり、第1象限の解： $\beta_1 \geq 0, \gamma_1 \geq 0$ 、第2象限の解： $\beta_2 \geq 0, \gamma_2 < 0$ 、第3象限の解： $\beta_3 < 0, \gamma_3 < 0$ 、第4象限の解： $\beta_4 < 0, \gamma_4 \geq 0$ となる。

Adkins and Paxson (2011), Tsujimura (2019) を参考に、一般解を特定化する。電力価格  $p$  が低くなると発電容量の価値も低くなる。もし、 $p \rightarrow 0$  となると、発電容量に投資する経済的な価値は無くなり、

$$\lim_{p \rightarrow 0} \phi(p, x) = 0 \tag{21}$$

となる。一方、電力価格  $p$  が高くなると発電容量の価値も高くなる。もし、 $p \rightarrow \infty$  となると、発電容量に投資する経済的価値も同様に限りなく大きくなり

$$\lim_{p \rightarrow \infty} \phi(p, x) = \infty \tag{22}$$

となる。したがって、 $\beta \geq 0$  となる。

容量価格  $x$  についても同様に考察する。もし、 $x \rightarrow 0$  となると、発電容量に投資する経済的な価値は無くなり、

$$\lim_{x \rightarrow 0} \phi(p, x) = 0 \quad (23)$$

となる。一方、もし、 $x \rightarrow \infty$  となると、発電容量に投資する経済的価値も同様に限りなく大きくなり

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \phi(p, x) = \infty \quad (24)$$

となる。したがって、 $\gamma \geq 0$  となる。これらの考察から、(15) の一般解 (19) は、

$$\phi(p, x) = A_1 p^{\beta_1} x^{\gamma_1} \quad (25)$$

となる。

閾値を  $(\bar{p}, \bar{x})$  とすると、続行領域は  $C = \{p < \bar{p}, x < \bar{x}\}$  となる。したがって、 $A_1, \bar{p}, \bar{x}, \beta_1, \gamma_1$  は、次の value-matching 条件と smooth-pasting 条件によって求められる。

$$\phi(\bar{p}, \bar{x}) = H(\bar{p}, \bar{x}) - I \quad (26)$$

$$\phi_p(\bar{p}, \bar{x}) = H_p(\bar{p}, \bar{x}) \quad (27)$$

$$\phi_x(\bar{p}, \bar{x}) = H_x(\bar{p}, \bar{x}) \quad (28)$$

(27), (28) より、次を得る。

$$\frac{1 - \alpha}{\beta_1 [r - (\mu_p - \sigma_p \kappa_p)]} \bar{p} = \frac{\alpha}{\gamma_1} \bar{x} \quad (29)$$

(26), (27) より、次を得る。

$$\frac{1 - \beta_1}{\beta_1} \frac{1 - \alpha}{r - (\mu_p - \sigma_p \kappa_p)} \bar{p} = \alpha \bar{x} - \left( \frac{c}{r} + b \right) \quad (30)$$

(26), (28) より、次を得る。



$$\left(\frac{\alpha(1-\gamma_1)}{\gamma_1}\right)\bar{x} = \frac{1-\alpha}{r-(\mu_P-\sigma_P\kappa_P)}\bar{p} - \left(\frac{c}{r}+b\right) \quad (31)$$

(30), (31) から, 閾値  $\bar{p}, \bar{x}$  がそれぞれ次のように得られる。

$$\bar{p} = \frac{\beta_1}{1-\beta_1-\gamma_1} \frac{r-(\mu_P-\sigma_P\kappa_P)}{1-\alpha} \left[-\left(\frac{c}{r}+b\right)\right] > 0 \quad (32)$$

$$\bar{x} = -\left[\frac{\gamma_1}{\alpha} \frac{\beta_1}{1-\beta_1-\gamma_1}\right] \left(\frac{c}{r}+b\right) > 0 \quad (33)$$

特性方程式 (20) の解  $\beta_1, \gamma_1$  の値が求まれば, 閾値の値が決まる。しかし, (20) からだけでは,  $\beta_1, \gamma_1$  の値は求まらない。そこで, 任意の  $\bar{x}$  に対して,  $\beta_1, \gamma_1$  の値を求め (29), (30) より, 次を得る。

$$G(\beta_1, \gamma_1; \bar{x}) := \frac{\alpha(1-\beta_1-\gamma_1)}{\gamma_1}\bar{x} + \frac{c}{r} + b = 0 \quad (34)$$

特性方程式 (20) と (34) を解くことで, 任意の  $\bar{x}$  に対して,  $\beta_1, \gamma_1$  が, それぞれ次のように求まる。

$$\beta_1 = 1 + B(\bar{x})\gamma_1 \quad (35)$$

$$\gamma_1 = \frac{-\Gamma_2 + (\Gamma_2^2 - 4\Gamma_1\Gamma_3)^{1/2}}{2\Gamma_1} \quad (36)$$

ただし,

$$B(\bar{x}) := \frac{1}{\alpha\bar{x}} \left(\frac{c}{r}+b\right) - 1 \quad (37)$$

$$\Gamma_1 := \frac{1}{2}\sigma_P^2 B(\bar{x})^2 + \frac{1}{2}\sigma_X^2 + \rho\sigma_P\sigma_X B(\bar{x}) \quad (38)$$

$$\Gamma_2 := \frac{1}{2}\sigma_P^2 B(\bar{x}) - \frac{1}{2}\sigma_X^2 + \rho\sigma_P\sigma_X + (\mu_P - \sigma_P\kappa_P)B(\bar{x}) + (\mu_X - \sigma_X\kappa_X) \quad (39)$$

$$\Gamma_3 := (\mu_P - \sigma_P\kappa_P) - r \quad (40)$$

である。

#### 4 感度分析

本節では、電力価格の閾値  $\bar{p} = \bar{p}(\bar{x})$  に対する感度分析を行う。基本ケースとして、仮想的にパラメータの値を設定する (表1)<sup>3)</sup>。まず、基本ケースにおける、 $A_1, \bar{p}, \bar{x}, \beta_1, \gamma_1$  の値を求めると、それぞれ次となる。 $A_1 = 43.3683, \bar{p} = 28.8713, \bar{x} = 10, \beta_1 = 1.3051, \gamma_1 = 0.0057$ 。

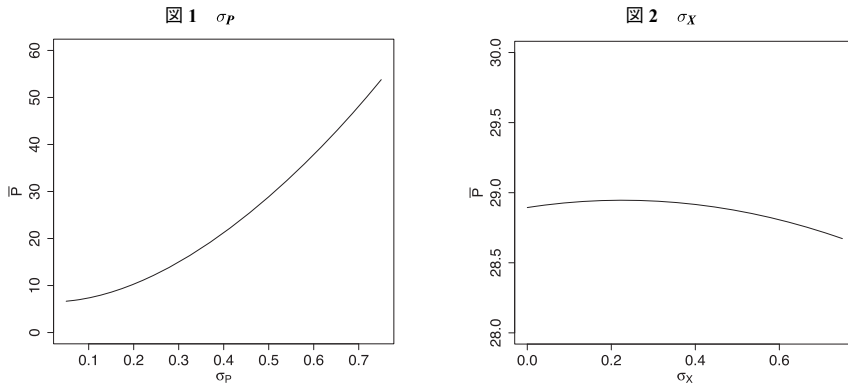
次に、電力価格と容量価格のボラティリティ： $\sigma_P, \sigma_X$ 、曖昧性の水準： $\kappa_P, \kappa_X$ 、期待変化率： $\mu_P, \mu_X$ 、発電容量の容量市場への売却割合  $\alpha$ 、容量価格の閾値  $\bar{x}$  の変化に対する電力価格の閾値  $\bar{p}$  の感度分析を行う。

ボラティリティ： $\sigma_P, \sigma_X$

リスクの大きさを表す電力価格と容量価格のボラティリティ  $\sigma_P, \sigma_X$  の変化が、電力価格の閾値  $\bar{p}$  に与える影響を図1・2にそれぞれ表した。図1によると、電力価格のボラティリティについては、ボラティリティの上昇に応じて電力価格の閾値も高くなる。すなわち、電力価格のリスクが大きくなるに従い、発電容量に対する投資が抑制されることが示されてた。次に、図2によると、容量価格のボラティリティについては、電力価格のボラティリティとは異なる結果が示された。ボラティリティが低い値から  $\partial \bar{p} / \partial \sigma_X = 0$  となる  $\sigma_X$  の値  $\sigma_X = 0.2273$  になるまで電力化価格の閾値は上昇し、その後はボラティリティの増加と共に電力価格の閾値は低下する。すなわち、容量価格のリスクが小さい間は、リスクが大きくなるに従い、発電容量に対する投資が抑制されるが、

表1 基準ケースのパラメータ値

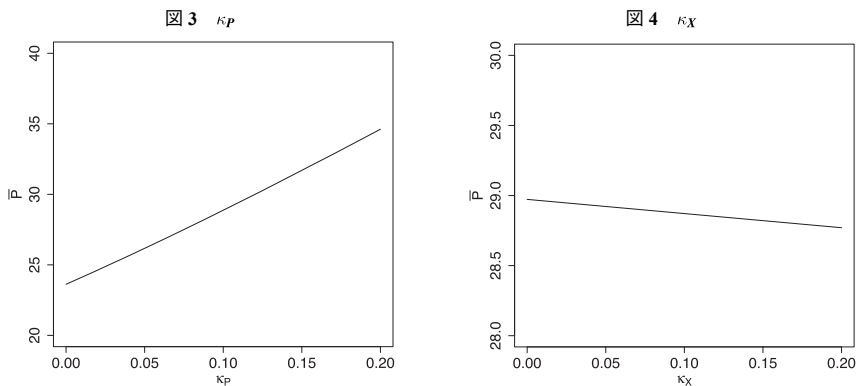
	表記	値
発電容量	$Q$	10
容量市場への売却割合	$\alpha$	0.2
割引率	$r$	0.05
電力価格の期待変化率	$\mu_P$	0.05
電力価格のボラティリティ	$\sigma_P$	0.5
容量価格の期待変化率	$\mu_X$	0.05
容量価格のボラティリティ	$\sigma_X$	0.5
電力価格の曖昧性の水準	$\kappa_P$	0.1
容量価格の曖昧性の水準	$\kappa_X$	0.1
電力価格と容量価格の相関係数	$\rho$	0.5
操業費用	$c$	5
発電容量1単位当たりの価格	$b$	10
容量価格の閾値	$\bar{x}$	10



ある水準を過ぎると、容量価格のリスクが大きくなるに従い、発電容量に対する投資が促進されることが示されていた。また、容量価格のボラティリティの変化に対する電力価格の閾値の変化は相対的に小さく、容量価格の閾値を所与として電力価格の閾値を求めているためと思われる。

**曖昧性の水準： $\kappa_p, \kappa_x$**

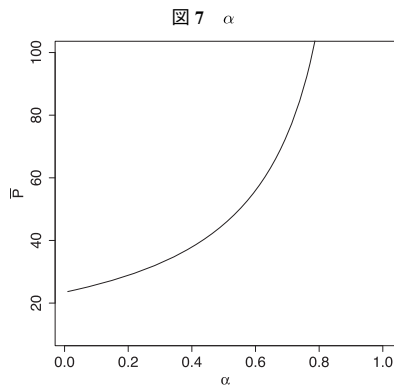
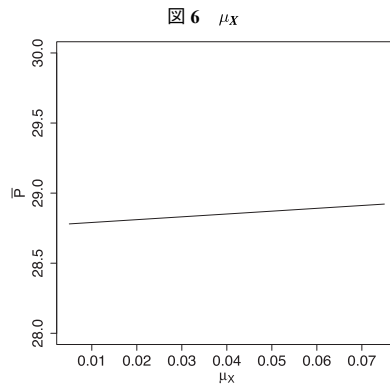
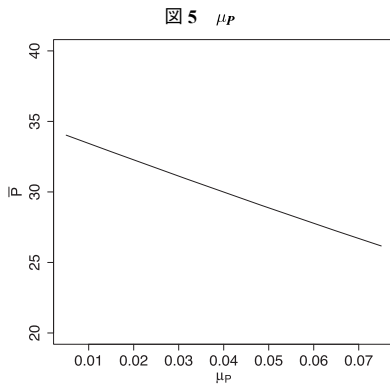
曖昧性の水準を表す  $\kappa_p, \kappa_x$  の変化が、電力価格の閾値  $\bar{p}$  に与える影響については、図3・4にそれぞれ表した。図3によると、電力価格に対する曖昧性の水準が大きくなると、電力価格の閾値は高くなる。すなわち、電力価格に対する曖昧性の水準が大きくなると、発電容量に対する投資が抑制されることが示された。このことは、電力価格に対する予見性が低下するほど、発電容量に対する投資が抑制されることを意味する。一方、図4によると、容量価格に対する曖昧性の水準が大きくなると、電力価格の閾値は低くなる。すなわち、電力価格の曖昧性とは逆の結果が示され、容量価格に対する曖昧性の水準が大きくなるに従い、発電容量に対する投資は促進される。このことは、容量



価格に対する予見性が低下するほど、発電容量に対する投資が促されることを意味する。また、容量価格に対する曖昧性の水準の変化に対する電力価格の閾値の変化は相対的に小さく、容量価格の閾値を所与として電力価格の閾値を求めているためと思われる。

#### 価格の期待変化率： $\mu_P, \mu_X$

電力価格と容量価格の期待変化率  $\mu_P, \mu_X$  の変化が、電力価格の閾値  $\bar{p}$  に与える影響を表したのが図5・6である。電力価格の期待変化率が大きくなると、電力価格の閾値は小さくなり、発電容量への投資が促進される。一方、容量価格の期待変化率が大きくなるに従い、電力価格の閾値も高くなり、発電容量に対する投資が抑制されることが示された。また、ボラティリティ、曖昧性の水準と同様に、容量価格の期待変化率の変化が閾値に与える影響は、相対的に小さいことが確認される。



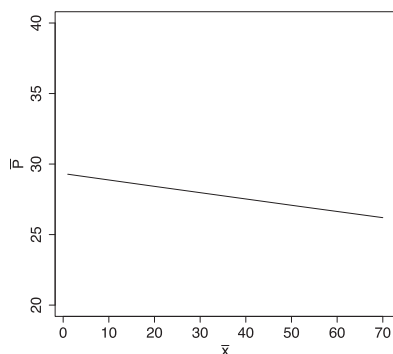
### 容量市場への売却割合： $\alpha$

発電容量を容量市場に売却する割合  $\alpha$  が、電力価格の閾値  $\bar{p}$  に与える影響を示したのが図7である。図7によると、容量価格の閾値  $\bar{x}$  が所与の下では、発電容量を容量市場に売却する割合が大きくなるに従い、電力価格の閾値が大きくなり、発電容量への投資が抑制されることが示された。

### 容量価格の閾値： $\bar{x}$

本研究は、電力価格の閾値を解析的に求めるために、容量価格の閾値  $\bar{x}$  を所与としている ( $\bar{p} = \bar{p}(\bar{x})$ )。容量価格の閾値の変化が電力価格の閾値に与える影響は、図8で示される。図8によると、容量価格の閾値が高くなるに従い、電力価格の閾値は低くなり、発電容量に対する投資が促進されることが示された。

図8  $\bar{x}$



## 5 ま と め

発電容量投資に対する予見性の低下の1要因として、電力価格と容量価格に対する曖昧性を考慮し、発電事業者の容量投資問題を考察した。発電事業者の問題は、最適停止問題として定式化され、変分不等式を用いて最適な投資タイミングを求めた。本稿では、投資タイミングを決める閾値を解析的に導出するため、容量価格の閾値を所与として、電力価格の閾値を求めた。さらに、数値例を用いて投資タイミングに対する示唆を明らかにした。主な結果として、電力価格の曖昧性が大きくなるに従い、容量への投資が抑制されること、容量価格の曖昧性が大きくなるに従い、容量への投資が促されることを示した。これらは、電力価格（容量価格）の予見性が低下するほど、容量への投資

が抑制（促進）されることを意味する。

本研究は、電力市場と容量市場を考慮した発電容量への投資についての理解を深めることを目的として、基本的な理論モデルを構築した。現実の発電容量への投資に対する評価モデルを構築するためには、以下のような拡張が考えられる。まず、発電容量については、火力発電容量の発電効率について考慮されていない。また、実際の投資には投資決定から発電容量が完成するまでのリードタイムが存在する。これらを考慮することが考えられる。次に、容量市場については以下が考えられる。容量市場は4年後から1年間の容量を取引する市場である。さらには、容量市場では価格の上限が設定されている。これらのメカニズムは考慮されていない。電力市場については、電力価格にはスパイクが観察されることから、この現象を反映させた価格過程が考えられる。これらの点ばかりではなく、その他にも、様々な容量市場の制度に適応したモデル開発が考えられる。

\*本研究は、同志社大学人文研第20期第16研究、JSPS 科研費 JP 21K01573 の助成を受けた。

#### 注

- 1) 詳しくは、経済産業省「総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 制度検討作業部会」における議論を参照されたい ([https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/denryoku\\_gas/seido\\_kento/index.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/index.html))。
- 2) 日本の容量市場では、4年後から1年間の発電容量を取引する。
- 3) 感度分析が目的であるため、各パラメータの単位については無次元量として計算している。

#### 参考文献

- Adkins, R. and D. Paxson (2011): "Renewing assets with uncertain revenues and operating costs", *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, **46**(3), 785-813.
- Brøndbo, H. K., A. Storebø, T. K. Boomsma, C. Skar, S.-E. Fleten (2020): "A real options approach to generation capacity expansion in imperfectly competitive power markets", *Energy Systems*, **11**(3), 515-550.
- Chen, Z. and L. Epstein (2002): "Ambiguity, risk, and asset returns in continuous time", *Econometrica*, **70**(4), 1403-1443.
- Delaney, L. (2022): "The impact of operational delay on irreversible investment under Knightian uncertainty", *Economics Letters*, **215**, 110494.

- IEA (2016) : *Re-Powering Markets: Market Design and Regulation During the Transition to Low-Carbon Power Systems*.
- Nishimura, K. and H. Ozaki (2007) : “Irreversible investment and Knightian uncertainty”, *Journal of Economic Theory*, **136**(1), 668-694.
- Thijssen, J. J. (2011) : “Incomplete markets, ambiguity, and irreversible investment”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, **35**(6), 909-921.
- Trojanowska, M. and P. M. Kort (2010) : “The worst case for real options”, *Journal of Optimization Theory and Applications*, **146**(3), 709-734.
- Tsujimura, M. (2019) : “Capital investment under output demand and investment cost ambiguity”, 『数理解析研究所講究録』 **2111**, 125-136.
- Viviani, J.-L., A.-N. Lai, and W. Louhichi (2018) : “The impact of asymmetric ambiguity on investment and financing decisions”, *Economic Modelling*, **69**, 169-180.
- Wang, Z. (2010) : Irreversible Investment of the Risk-and Uncertainty-averse DM under  $\kappa$ -Ignorance: The Role of BSDE”, *Annals of Economics and Finance*, **11**(2), 313-335.
- 国際連合広報センター (2019) 「SDGs (エス・ディー・ジーズ) とは? 17 の目標ごとの説明, 事実と数字」, url) [https://www.unic.or.jp/news\\_press/features\\_backgrounders/31737/](https://www.unic.or.jp/news_press/features_backgrounders/31737/) (閲覧日: 2022 年 8 月 10 日)。
- 服部徹 (2015) : 「容量メカニズムの選択と導入に関する考察: 不確実性を伴う制度設計への対応策」, 電力経済研究, **61**, 1-16。
- 資源エネルギー庁 (2016) : 「容量メカニズムについて」, url) [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/kihon\\_seisaku/denryoku\\_kaikaku/shijo\\_seibi/pdf/02\\_03\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/kihon_seisaku/denryoku_kaikaku/shijo_seibi/pdf/02_03_00.pdf) (閲覧日: 2022 年 8 月 10 日)。
- 資源エネルギー庁 (2021) : 「エネルギー基本計画」, url) [https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/pdf/20211022\\_01.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_01.pdf) (閲覧日: 2022 年 8 月 10 日)。
- 資源エネルギー庁 (2021) : 「火力発電を取り巻く情勢について」 url) [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/denryoku\\_gas/sekitan\\_karyoku\\_wg/pdf/008\\_05\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/sekitan_karyoku_wg/pdf/008_05_00.pdf) (閲覧日: 2022 年 8 月 10 日)。
- 高野祐人・高嶋隆太 (2015) : 「電力市場における容量メカニズムと電源投資」, 『数理解析研究所講究録』 **1933**, 184-192。
- 辻村元男 (2017) : 「曖昧性を考慮したプロジェクトへの投資タイミングの決定」, 『リアルオプションと戦略』 **9**(1), 51-56。